

基于无人机技术的输电线路运检智能化管理研究

郭子强 李学斌

国网保定供电公司

DOI:10.32629/hwr.v10i4.6932

[摘要] 随着电力系统的不断发展壮大以及电网运行规模越来越大,传统的输电线路人工巡检方式存在效率低、安全性差等问题,而无人机巡检方式具有覆盖面广、工作效率高、安全性好的特点已经成为目前输电线路隐患排查的主要方法。本文通过对输电线路运检智能化管理的研究,设计建立起了无人机巡检系统框架结构并介绍了航线编排及自主飞行控制、缺陷智能化检测识别、数据分析处理及三维重建等核心技术,提出了一种以“立体式巡检+集中监控”的新型运检管理方式以及智能化的发展方向。

[关键词] 无人机; 输电线路; 运检管理

中图分类号: TM726.2 文献标识码: A

Research on Intelligent Management of Transmission Line Operation and Inspection Based on UAV Technology

Ziqiang Guo Xuebin Li

State Grid Baoding Power Supply Company

[Abstract] With the continuous development and expansion of the power system and the increasing scale of power grid operation, the traditional manual inspection method for transmission lines suffers from low efficiency and poor safety. In contrast, unmanned aerial vehicle (UAV) inspection, characterized by wide coverage, high operational efficiency and excellent safety, has become the primary method for hidden danger detection of transmission lines. Based on the research on intelligent management of transmission line operation and inspection, this paper designs and establishes the framework of the UAV inspection system, and introduces its core technologies including route planning and autonomous flight control, intelligent defect detection and identification, data analysis and processing, as well as 3D reconstruction. Furthermore, a novel operation and inspection management mode of "three-dimensional inspection + centralized monitoring" is proposed, together with the development direction of intelligence.

[Key words] UAV; Transmission Line; Operation and Inspection Management

引言

保障架空高压输电线路走廊的安全是一项艰巨的任务。供电线路覆盖面非常广,而且大部分都是架设在艰苦的野外环境中,面临着管辖面广、设备环境恶劣、工作强度大等一系列问题的存在。这种走廊容易遭遇施工机械、火苗、线缆上的物体等多种外力引发的风险造成跳闸断电等重大灾难。随着人工智能技术的发展及应用,给电力工程建设管理带来了新的契机与可能。本文主要是想对利用无人机进行架空高压输电线路巡视检修智能管理系统进行研究探讨,从而提高巡查速度、减少安全隐患以及实行状态管理提供一种方案。

1 输电线路运检智能化管理的理论基础与发展意义

对于输电线路运维管理的理解就是保障电力输送通道的安全稳定运行,它具有设备跨度范围广、所处环境恶劣、潜在风险

种类繁杂的特点,在传统的手工巡视过程中存在着劳动强度大、安全风险高以及应对措施滞后等一系列问题,目前市场上的一些无人机巡检产品也曾遭遇过严重的图像上传延迟严重、云中心处理延时过长等问题,为了克服上述难题,北京科技研究院钟少波研究员团队创造性地提出了利用边缘计算与无人机巡检相结合的方法来解决输电线路异常目标识别的问题,当特高压电网建设不断加码时,输电线路巡检智能化的需求也愈发强烈了。

无人机技术在电力行业的运用也经历着从代替一部分人工上塔到现在完成无人驾驶技术的进步然后再到智能化升级的过程,当前无人机自主巡视已经成为输电运行维护的主要趋势。运行维护智能化管理系统技术框架包括感知层、网络层、平台层以及应用层。整个系统创造性地提出了“端侧智能+轻量化落地”的方案,在三个方面进行了创新性的解决行业难题。

2 基于无人机技术的输电线路运检系统构建

2.1 无人机巡检系统总体架构设计

无人机巡检系统的整体结构符合“飞行平台承载—感知模块采集—边缘计算处理—通信模块传输”的整个链条式硬件结构设计,在物理上它主要由无人机飞行平台、任务负载系统、地面控制系统以及数据传输系统四部分构成。此系统采用大疆M300 RTK工业级无人机搭配H20T云台相机配合Manifold 2-G边缘计算模块,利用E-Port接口进行高效率的数据传送,打造感知—计算—通信三位一体移动平台。逻辑上完成巡检任务下达、数据获取、智能化分析、反馈结果的流程体系。研制基于Web API的检测结果即时上送系统,完成对异常物体位置关联及显示,构成完整的“发现—定位—上报”的闭合回路。

2.2 飞行平台与任务载荷配置

飞行平台是整个系统的基础支撑体,要求有稳定可靠的飞行性能和足够的载重量以及对各种恶劣环境较强的适应能力。目前工业级无人机大多使用碳纤维复合材料机体,具有质轻强度高的特点,在十堰应用上,8轴16旋翼重载无人机的载重量最高可达300kg,飞行高度为1000m,最高飞行速度为60km/h,可以按实际需要采取降落、抛投、吊运等方式来进行物资运送,表1所示是几种不同的巡检任务对应的负载方案。

表1 不同巡检场景无人机任务载荷配置方案

巡检场景	飞行平台类型	核心载荷配置	关键技术参数	主要检测目标
常规巡检	四旋翼无人机	可见光相机	分辨率≥2000万像素,30倍光学变焦	绝缘子破损、金具锈蚀、鸟巢
红外测温	六旋翼无人机	红外热像仪	640×512像素,热灵敏度≤0.03℃	导线接头过热、绝缘子污秽
通道巡检	垂直起降固定翼	激光雷达	测距精度±2cm,扫描频率≥100Hz	树障隐患、交叉跨越、导线弧垂
边缘计算巡检	M300 RTK工业无人机	H20T云台相机+Manifold 2-G	32FPS实时推理,单帧处理时间31.2ms	多目标实时检测与定位

2.3 数据采集与传输体系构建

数据采集系统要适合各种类型的隐患特征获取需要,在实际操作过程中,在天津武清区2公里长的高压线路上进行试验的时候就成功地检测到了百分之九十以上的鸟巢物体目标,在一帧图像上的处理时间为31.2ms,与传统的云服务器相比,它的带宽的要求大大减少,响应速度快了一个数量级。通讯传送装置要能够在不同的情况下都可以保证正常的数据流传输。国家电网福州市电力公司采用的智能化飞行控制系统可以安装到汽车等交通工具上,在巡视过程中方便转移。一套终端可以操控多个御4系无人机协同飞行,在一键下达任务、自动航线设计以及自动分派任务的基础上,实现了一个操作人员控制多架无人机自主进行检测的工作方式,相比人工巡检的效率有了翻倍的增长;在智能飞行控制器系统方面把无人机作为空中移动基站来使用,创建出“空—空—地”的信号接力通路,实现了从上到底信号的传递,解决了无人机长距离监测通讯

中断的问题,能够跨越不同环境、远距离自主巡航监测,工作范围较人工巡检扩大了2.5倍。

3 无人机输电线路运检关键技术体系分析

3.1 航线规划与自主飞行控制技术

高精度航迹规划是保证无人机自主巡视的前提条件,苏交科集团开发的低空AI一体化巡视系统创造性地使用国产图形引擎以及3GDS技术对空域进行智能化建模及航线规划;通过多种信息源的数据集成和自主研发的AI算法即使在恶劣环境中仍然可以达到毫米级别的微裂纹检测准确率;基于边缘端的轻量级模型以毫秒级别处理实时监控视频流,极大地提高了监测速度,该系统还可以一键生成数字化巡检报告并能对未来病害发展情况进行推测以及智能化提出维护建议等。自主飞行控制系统利用高精度惯性导航装置和RTK实时修正定位达到厘米级别定位精确度。平台可以配置定期任务提前设定,无人机根据预设的任务自行开展一系列的“巡检前自检—智能化巡检—返航自动降落—数据存储”的过程,边缘计算+确定网络使超低功耗传输图像变为现实,大大延长了续航能力提升了40%,满足了长时间远程工作的需要。机库集群联网做到24小时待命,运维费用降低超过30%真正做到了“无人值守”,常态化的巡检。

3.2 输电线路缺陷智能识别技术

对于无人机巡检由于复杂的背景环境造成检测性能下降和在航拍画面中小范围的导线破损缺陷难以被发现或者误判的问题,利用深度学习的方法进行检测的研究是热点。用C2f_AK自适应卷积核来提高小目标特征的学习能力,使用BiFPN进行跨尺度信息融合,可以在保证网络瘦身的前提下提高对复杂条件下细微缺陷的检测水平。

3.3 运检数据处理与分析技术

激光点云数据处理是输电线路三维重构及隐患分析重要技术手段之一,包括点云对齐、点云去噪、点云分层建模以及点云变化监测等关键技术。时序点云数据差异分析方法可以实时监测杆塔变形,线路弧垂变化,通道植被生长等情况,其变化识别精确到厘米级^[1],激光点云建模是数据处理及分析的基础。国网丽水供电公司利用i国网、奥维互动地图等信息化方式强化过程控制,实行“计划—实施—监督—反馈”的闭环管理;对责任包片、“设备主人制”,让属地人员能第一时间发现险情并进行有效管控,在多次山火、洪涝灾害事件中做到了第一时间处置、第一时间控制,减少了平均应急响应时间58%左右、年运维成本下降近23%的比例,真正实现了“运维精细、响应迅捷、成本可控”。南网超高压公司南宁局搭建“感知—治理—智能—安全”的数据要素赋能体系,融合智能装置、传感器、图像视频等终端,形成对2841km输电线路以及5个变电站的“空天地”全方位感知网络,每年产生数据超过100TB。采取“边—云”一体化的方式,在变电站及输电线路路上布置边缘节点,利用算法对图片进行去模糊、降噪等操作,完成数据的初步预处理和简单的识别筛查工作,上传到云端的数据量下降了60%。

4 输电线路运检智能化管理模式与优化路径

4.1 运检管理模式创新与协同机制

“立体巡检+集中监控”的方法已经成为变电站运检管理模式发展的趋势,南方电网公司利用自己拥有自主知识产权的无人机优势,根据电力系统的发展情况,进行深入研究,取得了很好的成果——在智能化无人机巡线技术方面取得突破——超100万公里的输电线路开展了“机巡为主、人巡为辅”的新型运维方式,220千伏及以上网省地级输电智能巡视业务覆盖率提升至60%以上,缺陷识别准确率90%以上。广东电网公司在日前全面铺开基建领域“人工智能+”建设工作,以安全、质量、工期、造价、物资、技术等主要业务应用场景为基础,打造“1+1+N”人工智能体系,训练“1个智慧大脑”,研发“1套智慧感官”,构建“N个数字员工智能体”,建设贯穿基建全过程的感知网,达到机器自动判断及辅助决策的效果,系统化提升电网工程建设的设计到竣工全方位管理水平。

4.2 智能化平台与信息管理体系建设

智能巡检管控系统是推进运维检修智能化的重要依托。国家电网山东电力利用大负载无人机顺利实施首次起吊运输任务,共计运送3.1吨的检修设备从山脚安全送达海拔达826米高的山顶施工地点,解决了山区地形对物资输送所带来的难题^[2]。这款无人机能携带的最大负荷量为260kg的任务载荷,装载状态下最长可以飞行2个小时,最大通讯半径达到100km,并且具有7级防风等级,在山地、湖泊、郊外等地形地貌都可以自如工作。国网江苏南京供电公司建设“数智江宁”无人机巡检示范点,在南京市江宁区1600km输电线路全程开展了20个无人机基站的功能测试。此样板工程所覆盖的输电线路达到119条,变电站共有50个,1万km的配网线路^[3]。截至目前累计开展通道飞行1200多公里,开展精细化杆塔巡检1500多基,查找并消除缺陷隐患有720多起。

4.3 应用成效评估及优化发展路径

无人机技术应用于输电线路巡检效果良好。南方电网超高压公司南宁局实现500kV超高压变电站南宁站、永安站等5座无

人值班,采用“机器人巡检+远方调度”的方式,节约人力90名,生产效率提高70%,工作精确度提高50%,建立“电网—制造企业”大数据对接流程,变压器工作可靠度增加28%,全网设备故障减少56%。推进发展方向有四个方面,一是健全技术和管理规范,主编《变电站轮式机器人应用推荐规范》,参编团体标准3项;二是加强智能算法以及大数据相结合的能力;三是融合多种技术进行使用,建立“直流+安监”的两大模型;四是建立安全保障机制以及风险把控体系。

5 结语

本文对无人机巡检系统的总体框架及主要核心技术以及管理创新进行了详细的论述,在此过程中发现边缘计算以及轻量化部署技术能够实现无人机机载实时处理能力,检测反应速度由分钟级降至毫秒级,“一控多机”的智能机器人巡检装置让作业范围扩大2.5倍,工作效率提高3倍以上,并通过“立体巡检+集中监视”实现了运维监控向“现场无人化、作业自动化、决策智能化”转变。正在与一些电力公司进行产学研合作,对系统的可靠性进一步改进,在不同地形、气候等情况下的适应能力,同时探索用于远程复杂环境下巡检的可能性。今后,5G通讯、边缘智能、数字孪生等新技术不断融合后,无人机组群协同巡线、机上AI判断、空地一体观测等将成为输电线路运维智能化发展的主要趋势之一。

[参考文献]

- [1]艾洲,曲朝阳.基于IDD-Tiny-YOLO的输电线路绝缘子缺陷轻量化实时检测模型[J].电力大数据,2025,28(9):11-20.
- [2]张正鹏,刘建华,胡天硕,等.基于点云配准的LiDAR输电线路绝缘子3维重建[J].激光技术,2025,49(05):675-682.
- [3]吴小东,王冲,闻平,等.基于LiDAR+GIS的输电线路建模及巡检应用[J].测绘通报,2025,(01):1-5.

作者简介:

郭子强(1993--),男,汉族,河北霸州人,本科,工程师,研究方向:输电巡检。